

内陆及近岸二类水体透明度的遥感研究进展

A review on the estimation of Secchi disk depth by remote sensing in inland and nearshore case 2 waters

禹定峰^{1, 2, 3, 4}, 邢前国^{1, 3, 4}, 施 平^{1, 3, 4}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 4. 山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003)

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)07-0136-09
doi: 10.11759/hyxx20130324002

自 1865 年, 意大利天文学家 Pietro Angelo Secchi 发明塞克盘(Secchi disk)以来, 使用塞克盘测量水体透明度迄今已有近 150 a 的历史。透明度(Secchi disk depth)是指放入水中的塞克盘能够看得见的最大深度^[1]。它是描述水体光学性质的基本参数之一, 也是水质调查中的一个重要指标, 反映了水体的透光能力。在军事上是确定潜艇潜没深度和布设水雷的重要参数^[2]。在海洋水质监测中, 它是一种直观的指示参数, 可以评估水体的富营养化程度。水体透明度的变化会严重影响沉水植被的生长以及依靠可见光捕食的鱼类和水鸟等水生动物的生存。此外, 水体透明度可估算水体固有光学参数^[3-6]、叶绿素 a 浓度^[7]甚至是初级生产力^[8]。因此, 水体透明度的研究对水环境变化、水体光学参数、水生生态系统以及初级生产力的深入研究具有重要意义。然而, 尽管传统透明度测量方法操作简单, 但要实现监测大面积水体透明度的时空变化, 显然是不现实的。遥感技术具有快速、大面积、动态覆盖等优势, 能弥补传统测法耗时长且费用高的缺陷, 尤其是能监测人员较难到达的区域, 因而逐渐成为监测水体透明度的重要且有效的手段之一。

内陆及近岸二类水体是与人类关系最密切、受人类活动影响最剧烈的区域, 对于该区域的叶绿素 a、悬浮泥沙和黄色物质等相关综述较多^[9-13], 而透明度遥感的相关综述尚未见报道。本文对国内外透明度的遥感监测进行了系统地归纳总结, 为进一步开展透明度遥感估算工作提供参考。

1 透明度遥感估算的方法

国内外开展了很多内陆及近岸水体透明度遥感

方面的研究。研究区域包括湖泊、水库、池塘、河流、河口和海湾及近海等海岸带水体。大多学者利用实测的高光谱数据或卫星影像信息与实测透明度做相关分析构建透明度的遥感估算模型, 其中用到的卫星数据主要有水色卫星传感器 CZCS、SeaWiFS、MODIS、MERIS 以及陆地卫星传感器 MSS、TM、ETM+、CBERS、Quickbird 等; 不少利用叶绿素 a 浓度估算水体透明度; 另外, 也有学者通过基于固有光学参数的半分析算法估测水体透明度。水体透明度的遥感估算方法主要有经验方法、半分析方法和分析方法^[14]。

1.1 经验方法

经验方法是通过建立遥感数据与实时或准实时的地面实测透明度之间的统计回归模型。常用的方法有单波段算法、波段比值算法、多波段算法及光谱微分法等。该方法的优点是简单易用, 估算精度较高, 但二类水体的光学特性复杂多变, 具有很强的区域性和季节性特点。因此, 经验算法易受区域和时间的限制, 没有普适性。

1.2 半分析方法

半分析方法以光在水下的辐射传输理论为基础,

收稿日期: 2013-03-24; 修回日期: 2013-05-17

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020403); 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划(CAS/SAFEA); 中国科技部-欧洲空间局第三期龙计划项目(EPHURSUS, ID: 10558)

作者简介: 禹定峰(1986-), 男, 河南泌阳人, 博士研究生, 主要从事水色遥感算法研究, E-mail: dfyu@yic.ac.cn; 邢前国, 通信作者, 电话: 0535-2109125, E-mail: qgxing@yic.ac.cn

通过遥感反射率推算水体组分的吸收系数和散射系数,构建实测透明度数据和水质固有光学参数的关系,以估算水体透明度,该方法具有较好的物理解释和适用性。然而,由于受到观测仪器的限制,该方法中很多参数以现有的设备无法获取,因此很难广泛应用。此外,模型中某些参数常通过经验或半经验的方法计算,从而影响模型的精度^[15-16]。

1.3 分析方法

该方法是采用辐射传输方程来描述水体光谱与其组分含量之间的关系,通过求解辐射传输方程来获取各组分含量的一种估算方法^[17]。该方法中所用的参数均有明确的物理意义,不受时间和地域限制,且具有广泛的适用性。然而,分析算法主要受人们对大气辐射传输、水体以及透明度影响因子等认识的限制,在实际应用中很少^[18]。

2 透明度遥感估算的数据源

2.1 实测高光谱数据

高光谱数据可反映地物光谱的细微变化特征,能够精细地表征透明度的敏感波段,在透明度遥感中有着重要的应用价值。高光谱传感器分为成像和非成像两种,搭载在地面、飞机或卫星等不同的观测平台。

成像光谱技术将传统的图像与地物光谱结合起来,实现图谱合一,在获取地物空间图像的同时得到其连续的光谱曲线,在透明度遥感估算中有很大的应用潜力。根据机载高光谱仪获取的水体遥感反射率,模拟卫星传感器通道,通过构建基于波段差比值的方法来估测水体透明度,如 Härmä 等^[19]利用机载高光谱成像仪 AISA(Airborne Imaging Spectrometer for Applications)获取了芬兰南部湖泊 85 个样点和北海海岸带水体 107 个样点的光谱反射率,运用光谱平均法分别模拟了 TM、MODIS 和 MERIS 的光谱,研究发现可采用 TM 第 1 和 4 波段反射率的差值与 3 和 4 波段反射率差值的比值、MODIS 488 nm 和 748 nm 反射率的差值与 667 nm 和 748 nm 反射率差值的比值、MERIS 490 nm 和 754 nm 反射率差值与 620 nm 和 754 nm 反射率差值的比值等多波段差值比值法来估算水体透明度;Koponen 等^[20]通过对芬兰 4 个湖泊 1996~1998 年间的透明度数据和 AISA 采集的高光谱遥感数据研究发现,521 nm 和 791 nm 反射率的差值与 700 nm 和 791 nm 反射率差

值的比值可以估测该区域水体透明度,并按照小于 1 m、1~2.5 m 和大于 2.5 m 的标准把透明度分了 3 个等级,结合浊度和叶绿素 a 浓度等参数分析了该水域的水质状况。

非成像高光谱数据主要在野外或实验室内通过地面高光谱仪测量得到,水体的光谱反射率以图形等非影像形式显示。Thiemann 和 Kaufmann^[21]在德国 Mecklenburg 湖区利用实测高光谱数据提出了一种基于光谱系数估算透明度的方法。将处于 400 nm 到 750 nm 波谱范围内的原始光谱利用光谱平均法处理成 1 nm 光谱,把每个波谱曲线在短波可见光波段(430 nm 左右)的反射谷和位于可见光或近红外波段(一般是 750 nm 左右,清水是 600 nm 左右)的反射谷连起来构成一个基线,计算基线与光谱曲线围成的曲面面积,再将该面积除以波段数得到的数值即波谱系数,通过波谱系数与透明度之间的相关分析,建立了基于波谱系数的透明度指数模型,其决定系数达 0.99。并将该算法应用到德国 CASI(Compact Airborne Spectrographic Imager)和澳大利亚 HyMap(Hyperspectral Mapper)等机载高光谱传感器,绘制了该区域水体透明度的时空变化分布图。在国内,傅克忭等^[22]基于现场离水辐亮度提出可以分别采用 443 nm 与 665 nm 的辐亮度比值以及 443 nm 与 665 nm 辐亮度之和与 490 nm 的比值来估算黄海水体透明度,率先开展了利用实测水体高光谱数据对我国海水透明度估算模型的研究;王晓梅等^[23]在大量实测数据的基础上,提出了一种基于 490、555 和 670 nm 多波段遥感反射比组合的黄东海透明度统计估算模式;段洪涛等^[24]通过对吉林查干湖通过分析对水体透明度与光谱特征的响应关系,分别建立了基于 720 nm 反射率的单波段估测模型以及 520 nm 与 780 nm 反射率的差值与 720 nm 与 780 nm 反射率差值之比的比值估测模型,研究结果表明,单波段模型估测效果优于比值模型,对数比值模式又好于单纯的比值模式;宋开山等^[25]利用实测查干湖高光谱数据,建立了透明度的单波段估测模型、比值估测模型及神经网络高光谱估测模型,并对模型以确定性系数和剩余残差为指标进行了验证,结果表明,神经网络模式是三者中最优的;段洪涛等^[26]通过分析长春南湖透明度与其高光谱反射率之间的相关关系,采用单波段、波段比值和一阶微分法建立了透明度高光谱定量模型;丛丕福等^[27]以辽东湾为研究区域,采用现场实测光谱采用光谱平均法模拟 MODIS 波段,通过对单波段

和波段比值算法的比较,建立了基于 MODIS 667 nm 反射率的三次多项式回归模型,该研究认为 667 nm 波段对于建立海水透明度模型要优于传统认为的蓝绿光波段;陈蕾等^[28]通过对离水光谱反射率及其负对数与水体透明度的相关分析,发现利用 559 nm 处的离水光谱反射率负对数的乘幂回归模型可获得较好的估算效果,该模型为南海近岸海水透明度的卫星遥感提供了基础支撑。

基于实测高光谱数据来估算水体透明度,高的光谱分辨率有利于发现水体透明度更为精细的敏感波段;通过实测光谱来模拟卫星传感器,可以有效地消除大气效应的影响,为卫星遥感水体透明度提供参考。

2.2 卫星遥感数据

2.2.1 水色遥感数据

1978 年发射的雨云-7 号卫星开创了水色遥感的新纪元,其搭载的 CZCS 被应用于透明度的遥感探测,如 Binding 等^[29]利用 CZCS 的 550 nm 和 SeaWiFS 的 555 nm 反射率建立了针对美国伊利湖的透明度线性估算模型,并利用建立的模式对该湖透明度多年月平均变化进行了分析。然而,CZCS 的空间分辨率、辐射分辨率和大气校正精度均有限,从而在水体透明度估算上存在一定误差,限制了该传感器的广泛使用。

随着水色遥感研究理论和技术水平的不断提高,具有较高的光谱分辨率和时间分辨率的第二代水色卫星传感器相继发射升空,其中用于透明度遥感的主要有 SeaWiFS、MODIS、MERIS。Chen 等^[3]采用 SeaWiFS 数据对美国坦帕湾 1997~2005 年间的透明度进行了估算并深入讨论了透明度的影响因素;Shahraini 等^[30]以实测透明度数据和 SeaWiFS 卫星数据,深入分析了利用 SeaWiFS 的处于大气顶层的遥感反射率与大气底部的遥感反射率估算里海海岸带水体透明度的优劣,研究表明大气底部遥感反射率优于顶层的,提出以 681 nm 和 560 nm 波段的大气底部遥感反射率的比值为自变量,以透明度倒数为因变量的透明度线性估算算法;Doron 等^[31]采用 SeaWiFS、MODIS 和 MERIS 的 490 nm 和 560 nm 反射率的比值(R_{490}/R_{560})来估算海岸带水体和大洋水体的透明度,利用该模式估算了全球海水透明度。该算法的应用前提是 R_{490} 介于 $0.005\sim 0.22\text{ sr}^{-1}$, R_{560} 介于 $0.006\sim 0.3\text{ sr}^{-1}$, R_{560}/R_{490} 介于 $0.22\sim 3.5\text{ sr}^{-1}$;Guan 等^[32]

利用 TM 第 1 和 3 波段反射率的比值及其第 3 波段的反射率构建的线性模型来估测加拿大 Simcoe 湖的透明度,并利用此算法分析了该湖透明度的时空变化情况及其影响因素;Mantas 等^[33]在葡萄牙蒙特古河采用 MODIS 的 469 nm 和 555 nm 反射率的比值建立了估算透明度的线性回归模型;Knight 和 Voth^[34]利用 MODIS 的第 1 和 3 波段反射率的线性组合构建了透明度指数估算模型,据此估算了美国明尼苏达全州的湖泊透明度,并进一步评估了湖泊富营养化程度。在国内,吴敏等^[35]利用巢湖的透明度与 MODIS 各个波段辐亮度做回归分析,建立了基于 MODIS 第 11 和 10 波段辐亮度之比与第 1 波段和 1、3、5 波段辐亮度之和比值的透明度多元回归估测模型;Guofeng Wu 等^[36]通过对 TM 和 MODIS 波段与鄱阳湖水透明度进行了分析,构建了基于透明度自然对数和蓝、红波段自然对数的线性模型,并指出 MODIS 估算水体透明度优于 TM。

水色卫星传感器用于透明度的遥感估算,优势较多:较高的时间分辨率,如 MODIS 为 1~2 d、MERIS 为 2~3 d 对于透明度快速、周期性监测具有重大应用潜力;较高的光谱分辨率和合理的通道设置,如 SeaWiFS 有 8 个通道、MODIS 有 9 个水色波段、MERIS 共有 15 个光谱通道,除设置有监测水色组分的通道外,还有用于大气校正的通道;然而,水色卫星传感器的动辄几百米、甚至千米级的空间分辨率,不适用于较小区域水体透明度的监测。

2.2.2 其他卫星数据

Landsat 卫星携带的 MSS、TM 和 ETM+传感器具有空间分辨率较高、数据获取方便等优势,在透明度估算及其时空变化监测中得到广泛应用,如 Harrington 和 Schiebe^[37]在美国的 Lake Chicot 研究发现,MSS 影像的第 2 和 3 波段对透明度较为敏感,可用于透明度的遥感估算与动态监测;Lathrop 和 Lillesand^[38]在美国 Green Bay 和 Lake Michigan 利用 TM 绿波段估测透明度;Dekker^[39]根据实测水表面以下反射率与透明度的相关分析,建立了以 706 nm 和 676 nm 刚好在水表面以下辐照度反射率比值为参数的透明度估算指数模型;Lavery 等^[40]利用 TM 第 1 和 3 波段反射率的比值及其第 3 波段反射率的线性组合,通过多元线性回归估算了澳大利亚西南地区的 Harvey 河口水体透明度;Dekker 和 Peters^[41]分析了 TM 数据在荷兰富营养化湖泊水质遥感中的适用范围和影响因素,认为 TM 第 1 到 4 波段的灰度值可用

于水体透明度的遥感估算; Nellis 等^[42]采用 TM 第 3 波段的反射率研究了美国堪萨斯州水库透明度分布的空间变化; Allee 和 Johnson^[43]针对美国阿肯色州 Bull Shoals 水库开发了基于 TM 第 2、3 和 5 波段反射率自然对数的透明度线性估算模式; Kloiber 等^[44]对美国 6 个州近 500 个湖泊的透明度及 3 景 MSS 和 10 景 TM 影像研究分析, 结果表明可分别利用 MSS 第 1 和 2 波段反射率的比值及其第 1 波段的反射率、TM 第 1 和 3 波段反射率的比值及其第 1 波段的反射率估算水体透明度, 研究发现尽管在 1973~1998 年间研究区土地利用发生较大改变, 但只有 49 个湖泊的透明度发生了变化; Lillesand^[45]采用 TM 第 1 和 2 波段反射率的比值研究了美国威斯康星州约 7 000 个湖泊透明度时空变化情况, 并用搭载在 TERRA 卫星上的 MODIS 绿/红波段比值法估算了 2001 年 Green Bay 和 Lake Michigan 夏季水体透明度; Zhang 等^[46]提出一种综合利用 TM 7 个波段反射率的光学数据和 ERS-2 SAR 微波数据的神经网络算法来估算芬兰湾的透明度, 该算法的决定系数高达 0.95; Nelson 等^[47]采用 ETM+ 第 1 和 2 波段反射率比值法对美国密歇根州 93 个湖泊的透明度进行了估算, 结果表明, 所建立的模型对透明度小于 1.5 m 的估算精度较高; Hellweger 等^[48]采用 TM 第 3 波段反射率估测了美国纽约湾透明度; Giardino 等^[49]运用 TM 第 1 和 2 波段反射率比值的线性回归模型来估算意大利 Lake Iseo 透明度, 并绘制了该湖透明度分布图; Nelson 等^[50]研究发现 TM 第 2 和 4 波段反射率的比值可以用来估算美国密歇根州三个内陆湖泊的水体透明度, 但应用于本地区其他四个湖泊时, 所建立的模型精度很低, 这表明该模型并没有通用性, 同时讨论了遥感估算透明度的影响因素; Olmanson 等^[51]以 TM 第 1 和 3 波段反射率的比值及其第 1 波段反射率为自变量, 以实测的透明度为因变量, 对美国明尼苏达州约 10 000 个湖泊的透明度进行了估算, 分析了全州湖泊透明度的空间分布特征及其影响因素; 在国内, 王学军和马延^[52]采用主成分分析的方法, 建立了基于以 TM 第 1、2、3、5 和 7 波段辐亮度自然对数的线性组合为因子的太湖透明度指数估算模型。赵碧云等^[53]通过对滇池全湖水体透明度与 TM 不同波段辐亮度组合的关系进行了关联度分析, 据此建立了 TM 第 4 波段辐亮度的单波段指数模型, 该模型被成功用于滇池透明度的动态遥感监测。王得玉等^[54]利用三景 TM 影像, 采用 TM 第 1 和 3 波段辐亮度比值

法分析了钱塘江入海口水体透明度的时空变化情况, 并讨论了引起这种变化的原因。邬国锋等^[55]结合 6 景 TM 影像与对应的实测透明度数据, 建立了基于蓝、红波段自然对数与透明度自然对数的线性模型, 该模型能够解释鄱阳湖 88% 水体透明度变化; Duan 等^[56]分别对 TM 1 到 4 单波段、波段比值和波段平均值与查干湖和新庙湖的透明度回归分析发现, TM 第 3 和 2 波段反射率的比值、第 3 和 1 波段反射率的比值、第 1 和 4 波段反射率的均值以及第 3 和 2 波段反射率的均值可以用于该区域内陆湖泊透明度的遥感估算。Zhao 等^[57]以太湖及其入湖河流为研究区进行了研究, 结果表明, ETM+ 第 3 和 1 波段反射率的比值与第 1 波段反射率组成的线性组合可以用来估算该区域的透明度, 此外, ETM+ 第 8 波段可用于平均宽度大于 40 m 的河流透明度估算。

中巴资源卫星 CBERS, 与 Landsat 系列卫星相比, 其最高分辨率达 19.5 m。也有学者运用 CBERS 对水体透明度的进行遥感估算研究, 如王爱华等^[58]经灰色关联度分析表明, CBERS 第 1 和 3 波段的比值可估算农区水体透明度。

Quickbird 卫星于 2001 年发射升空, 其空间分辨率高达 0.61 m, 为水体透明度的遥感估测提供了更高的空间分辨率数据, 如 Yüzügüllü 和 Aksoy^[59]运用神经网络的方法对 Quickbird 影像不同波段组合来估测土耳其 Eymir 湖的透明度, 取得了较好的效果。

这些卫星传感器与水色的相比, 普遍具有较高的空间分辨率, 如 Quickbird 卫星的空间分辨率更是高达 0.61 m, 这对内陆湖泊、河流等较小区域水体透明度的遥感监测极其有利; Landsat-1 于 1972 年发射升空, 目前 Landsat-7 仍在轨运行, 这为利用 Landsat 卫星长时间遥测水体透明度提供了可能; 然而, 陆地卫星传感器的劣势在于: 其波谱分辨率较低, 且没有估测水体组分和大气校正波段; 陆地卫星的轨道周期一般较长, 如 Landsat 卫星为 16 d, 如果再加上云雨对卫星影像的影响, 显然无法满足快速、周期性监测的要求。

3 透明度估算方法

3.1 基于叶绿素 a 质量浓度估算透明度

很多学者研究发现, 叶绿素 a 质量浓度与光束衰减系数之间具有很高的相关性^[60-61], 而这种生物光学特性直接影响光在水下的传播, 进而影响水体透明度。不少学者研究表明, 透明度与叶绿素 a 浓度

之间呈现负指数关系, 关系式为:

$$SDD = a\rho_{\text{Chl-a}}^b \quad (1)$$

式中, SDD表示透明度, 单位为m, a 、 b 为经验系数, $\rho_{\text{Chl-a}}$ 表示叶绿素a质量浓度, 单位为 mg/m^3 。Carlson^[62]在研究湖泊水体的富营养状态指数时发现, 水体的叶绿素a质量浓度与透明度呈高度相关关系, 相关系数达0.93; Sasaki等^[63]在日本的Tokyo Bay和Sagami Bay研究表明秋季叶绿素a质量浓度与透明度之间存在一定关系; 费尊乐等^[64]分析东海黑潮区浮游植物与海水光化学参数之间的相关关系, 建立了基于叶绿素a质量浓度透明度估算模型; 李宝华和傅克付^[65]在对南黄海进行研究时, 提出该海域中悬浮物主要来自浮游植物, 海水中浮游植物的光学特性决定了该海域中海水的光学特性, 从而决定了海水的透光度, 建立了透明度与叶绿素a质量浓度之间的关系式; Megard和Berman^[66]在地中海东南海域研究藻类对透明度的影响时, 结果表明, 可以用叶绿素a质量浓度估算透明度, 二者呈反比关系。此外, Morel等^[67]通过30 531个透明度现场观测数据和与其时空匹配的卫星估算叶绿素a质量浓度数据, 建立了二者之间的经验模型。基于叶绿素a质量浓度透明度估算算法见表1。

由表1可以看出, 基于叶绿素a质量浓度的经验模型, 容易受建模时观测时间和海区的影响, 根本在于不同海域叶绿素a质量浓度是不同的, 如费尊乐等^[64]研究区叶绿素质量浓度为 $0.1\sim 4.4\text{ mg}/\text{m}^3$, 而Megard和Berman^[66]的仅为 $0.02\sim 0.14\text{ mg}/\text{m}^3$ 。此外, Morel等^[67]是根据卫星估算的叶绿素a质量浓度来估算水体透明度, 显然此算法受遥感数据精度的限制, 而卫星遥感的叶绿素a产品常常会出现高估或低估的现象。

需要说明的是, 以叶绿素a质量浓度估算透明度, 针对的是没有或很少悬浮泥沙的水体。

表1 基于叶绿素a质量浓度估算透明度的经验算法

| 区域 | 算法 | 来源 |
|-------|--|------|
| 湖泊 | $SDD = 7.69\rho_{\text{Chl-a}}^{-0.68}$ | [62] |
| 海湾 | $SDD = 11.4\rho_{\text{Chl-a}}^{-0.474}$ | [63] |
| 东海黑潮区 | $SDD = 12.692\rho_{\text{Chl-a}}^{-0.361}$ | [64] |
| 南黄海 | $SDD = 7.4595\rho_{\text{Chl-a}}^{-0.7325}$ | [65] |
| 地中海 | $SDD = (0.023 + 0.14\rho_{\text{Chl-a}})^{-1}$ | [66] |
| 全球水体 | $SDD = 13.5 - 19.6X + 12.8X^2 - 3.8X^3$, $X = \lg \rho_{\text{Chl-a}}$ | [67] |

3.2 利用固有光学参数估算透明度

随着水色遥感研究的不断深入, 不少学者尝试采用基于生物光学模型和水下辐射传输理论建立透明度估算的半分析模型, 该模型具有较好的物理解释和适用范围。

何贤强等^[18]以中国近海为研究区, 根据水下辐射传输和对比度传输理论, 建立了基于490 nm波段吸收系数和后向散射系数的透明度半分析模式, 并用该模式估算了1999年中国海的透明度。然而, 该模型中的吸收系数和后向散射系数均由叶绿素a浓度计算得到, 因此模型的应用受叶绿素a含量反演精度的限制。此外, 对于一类水体, 采用该模式反演得到的透明度与实测透明度的相关系数为0.84, 绝对平均误差为4.17 m, 相对平均误差为22.6%, 反演效果较好; 但对于二类水体, 反演效果则不理想。

Tyler^[1]和 Preisendorfer^[68]深入研究了透明度与水体光学参数之间的关系, 在不考虑测量环境和观测人员的情况下, 透明度主要取决于水体的固有光学特性。在此基础上, Doron等^[69]建立了基于490 nm波段漫衰减系数和光束衰减系数的透明度半分析估算模式。Doron等^[69]以709 nm为参考波长, 采用Lee等^[70]创建的QAA算法(Quasi-Analytical Algorithm)计算490 nm波段的漫衰减系数和光束衰减系数。然而, 由于水体在长波处的强烈吸收, 采用709 nm在大部分近岸水体可能是失效的, 在最新版本的QAA算法中, 推荐使用的参考波长为550, 555和640 nm。

魏国妹等^[71]以北部湾为研究区, 采用Doron等^[69]算法估算了该区域的水体透明度。研究表明, 至少对于北部湾这样的近岸水体, 海洋遥感结合固有光学量的估算, 可取得较高精度的透明度遥感估算。然而, 作者未给出利用QAA算法计算490 nm波段吸收系数和散射系数时所采用的参考波长; 另外, 在利用QAA算法计算水体固有光学量时, 对某些参数的取值可能会对模型有所影响, 如颗粒物的后向散射系数与总散射系数的比值取为0.02。

林法玲^[72]以台湾海峡西部沿岸为研究区, 基于SeaWiFS数据采用魏国妹等^[71]算法估算了该海域1998~2010年水体透明度, 研究表明, 海峡西岸活跃的经济活动没有对沿岸水质产生显著的破坏性影响。

4 存在问题与展望

尽管国内外在二类水体透明度遥感方面做了大量研究、取得了很大进展, 但也存在一些问题: 透明

度的遥感估算主要以经验方法为主,模型的可移植性差;主要采用的是光学传感器;利用 QAA 算法估算的水体吸收系数和散射与实测值存在 10% 的偏差^[73],影响了透明度估算的精度。

关于二类水体的透明度遥感,今后的工作应重点关注:(1) 内陆和近岸二类水体光学性质是比较复杂的,不同区域的水体,其光学特性差异很大,且季节性变化很大。因此,开发适用于特定区域算法是有必要的,且区域模型研究有助于全球二类水体透明度遥感的进一步发展。(2) 深化对已有传感器在透明度遥感中的研究,不断将新的数据源应用于透明度的遥感估测,新的传感器往往有较高的光谱分辨率和空间分辨率,如搭载在我国环境一号卫星上的 HSI(Hyper-Spectral Imager)超光谱传感器和 CCD 相机(Charge-Coupled Device),以及美国的 HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Imager)高光谱传感器等。(3) 多种遥感数据结合,以提高透明度估算的精度。(4) 基于现有的遥感数据,开展水体透明度长时间遥感估测,以研究在全球气候变化和人类活动对透明度的影响。(5) 加强对二类水体大气校正算法的研究。大气校正是利用机载或卫星传感器估测水体透明度研究中的难点,其准确与否直接决定透明度遥感估算模型的精度。需根据二类水体的特点,建立实用的大气校正算法。(6) 更加深入地研究透明度的影响因素及水体光学性质,结合辐射传输理论,开发物理意义明确的算法。

参考文献:

- [1] Tyler J E. The Secchi disc[J]. Limnology and Oceanography, 1968, 13(1): 1-6.
- [2] 何贤强,潘德炉,黄二辉,等. 中国海透明度卫星遥感监测[J]. 中国工程科学, 2004, 6(9): 33-37.
- [3] Chen Z Q, Muller-Karger F E, Hu C M. Remote sensing of water clarity in Tampa Bay[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(2): 249-259.
- [4] Kratzer S, Håkansson B, Sahlin C. Assessing Secchi and photic zone depth in the Baltic Sea from satellite data[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2003, 32(8): 577-585.
- [5] Son S, Campbell J, Dowell M, et al. Primary production in the Yellow Sea determined by ocean color remote sensing[J]. Maine Ecology Progress Series, 2005, 303: 91-103.
- [6] Levin I, Radomyslskaya T. Estimate of water inherent optical properties from Secchi depth[J]. Atmospheric and Oceanic Physics, 2012, 48(2): 214-221.
- [7] Kosten S, Vernooij M, Vannes E H, et al. Bimodal transparency as an indicator for alternative states in South American lakes[J]. Freshwater Biology, 2012, 57: 1191-1201.
- [8] Falkowski P G, Wilson C. Phytoplankton productivity in the North Pacific ocean since 1900 and implications for absorption of anthropogenic CO₂[J]. Nature, 1992, 358(6389): 741-743.
- [9] 邢小罡,赵冬至,刘玉光,等. 叶绿素 a 荧光遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2007, 11(1): 137-143.
- [10] 刘大召,付东洋,沈春燕,等. 河口及近岸二类水体悬浮泥沙遥感研究进展[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(4): 611-616.
- [11] 刘志国,周云轩,蒋雪中,等. 近岸 类水体表层悬浮泥沙浓度遥感模式研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 321-326.
- [12] 沈红,赵冬至,付云娜,等. 黄色物质光学特性及遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2007, 10(6): 949-954.
- [13] Odermatt D, Gitelson A, Brando V E, et al. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118: 116-126.
- [14] Sathyendranath S. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters[R]. Dartmouth: the International Ocean-Colour Coordinating Group, 2000.
- [15] Qing S, Tang J W, Cui T W, et al. Retrieval of inherent optical properties of the Yellow Sea and East China Sea using a quasi-analytical algorithm[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(1): 33-45.
- [16] 崔廷伟,张杰,唐军武,等. 黄东海浑浊水体固有光学参数的卫星反演[J]. 中国光学快报, 2010, 8(8): 721.
- [17] 王皓,赵冬至,王林,等. 水质遥感研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 285-288.
- [18] 何贤强,潘德炉,毛志华,等. 利用 SeaWiFS 反演海水透明度的模式研究[J]. 海洋学报, 2004, 26(5): 55-62.
- [19] Härmä P, Vepsäläinen J, Hannonen T, et al. Detection of

- water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland[J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, 268(1-3): 107-121.
- [20] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K, et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(1): 51-59.
- [21] Thiemann S, Kaufmann H. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data—a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 228-237.
- [22] 傅克付, 曾宪模, 任敬萍, 等. 由现场离水辐亮度估算黄海透明度几种方法的比较[J]. *黄渤海海洋*, 1999, 17(2): 19-24.
- [23] 王晓梅, 唐军武, 丁静, 等. 黄海、东海二类水体漫衰减系数与透明度反演模式研究[J]. *海洋学报*, 2005, 27(5): 38-45.
- [24] 段洪涛, 张柏, 宋开山, 等. 查干湖透明度高光谱估测模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(1): 156-160.
- [25] 宋开山, 张柏, 王宗明, 等. 半干旱区内陆湖泊透明度高光谱估测模型研究——以松嫩平原查干湖为例[J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 790-796.
- [26] 段洪涛, 张柏, 宋开山, 等. 长春南湖水体透明度高光谱定量模型研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2006, 23(5): 633-639.
- [27] 丛丕福, 曲丽梅, 韩庚辰, 等. 辽东湾海水透明度的遥感估算模型[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 295-299.
- [28] 陈蕾, 谢健, 彭晓鹃, 等. 珠江口海水透明度与光谱相关关系研究[J]. *国土资源遥感*, 2011, 3: 151-155.
- [29] Binding C E, Jerome J H, Bukata R P, et al. Trends in water clarity of the lower Great Lakes from remotely sensed aquatic color[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2007, 33(4): 828-841.
- [30] Shahraini H T, Sharifi H, Sanaeifar M. Development of clarity model for Caspian Sea using MERIS data[C]// Charles R. *International Society for Optics and Photonics*. Miguel Velez-Reyes Prague: Czech Republic, 2011: 817516-1.
- [31] Doron M, Babin M, Hembise O, et al. Ocean transparency from space: Validation of algorithms estimating Secchi depth using MERIS, MODIS and SeaWiFS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 2986-3011.
- [32] Guan X, Li J, Booty W G. Monitoring Lake Simcoe Water Clarity Using Landsat-5 TM Images[J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(8): 2015-2033.
- [33] Mantas V, Pereira A, Neto J, et al. Monitoring estuarine water quality using satellite imagery. The Mondego river estuary (Portugal) as a case study[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 72: 1-9.
- [34] Knight J F, Voth M L. Application of MODIS Imagery for Intra-Annual Water Clarity Assessment of Minnesota Lakes[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(7): 2181-2198.
- [35] 吴敏, 王学军. 应用 MODIS 遥感数据监测巢湖水质[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(2): 110-113.
- [36] Wu G F, De Leeuw J, Skidmore A K, et al. Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo-spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(8): 2183-2198.
- [37] Harrington Jr J A, Schiebe F R, Nix J F. Remote sensing of Lake Chicot, Arkansas: monitoring suspended sediments, turbidity, and secchi depth with Landsat MSS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39(1): 15-27.
- [38] Lathrop R G, Lillesand T M. Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and central Lake Michigan[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, 52: 671-680.
- [39] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing[D]. Amsterdam: University of Amsterdam, 1993.
- [40] Lavery P, Pattiaratchi C, Wyllie A, et al. Water quality monitoring in estuarine waters using the Landsat Thematic Mapper[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 46(3): 268-280.

- [41] Dekker A, Peters S. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(5): 799-821.
- [42] Duane Nellis M, Harrington J A, Wu J. Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas: 1993[J]. *Geomorphology*, 1998, 21(3): 281-293.
- [43] Allee R, Johnson J. Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll a and Secchi disc depth of Bull Shoals Reservoir, Arkansas, USA[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(6): 1057-1072.
- [44] Kloiber S M, Brezonik P L, Bauer M E. Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity[J]. *Water Research*, 2002, 36(17): 4330-4340.
- [45] Lillesand T M. Combining satellite remote sensing and volunteer Secchi disk measurement for lake transparency monitoring[J/OL]. [2013-02-28]. <http://acwi.gov/monitoring/conference/2002/Papers-Alphabetical%20by%20First%20Name/Thomas%20Lillesand-Satellite.pdf>.
- [46] Zhang Y Z, Pulliainen J, Koponen S, et al. Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the Gulf of Finland using combined optical data and microwave data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 327-336.
- [47] Nelson S A C, Soranno P A, Cheruvilil K S, et al. Regional assessment of lake water clarity using satellite remote sensing[J]. *Journal of Limnology*, 2003, 62(Suppl.1): 27-32.
- [48] Hellweger F, Schlosser P, Lall U, et al. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(3): 437-448.
- [49] Giardino C, Pepe M, Brivio P A, et al. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 268(1): 19-29.
- [50] Nelson S A C, Cheruvilil K S, Soranno P A. Satellite remote sensing of freshwater macrophytes and the influence of water clarity[J]. *Aquatic Botany*, 2006, 85(4): 289-298.
- [51] Olmanson L G, Bauer M E, Brezonik P L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10 000 lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(11): 4086-4097.
- [52] 王学军, 马延. 应用遥感技术监测和评价太湖水质状况[J]. *环境科学*, 2000, 21(6): 65-68.
- [53] 赵碧云, 贺彬, 朱云燕, 等. 滇池水体中透明度的遥感定量模型研究[J]. *环境科学与技术*, 2003, 26(2): 16-17.
- [54] 王得玉, 冯学智. 基于 TM 影像的钱塘江入海口水体透明度的时空变化分析[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(2): 185-189.
- [55] 邬国锋, 刘耀林, 纪伟涛. 基于 TM 影像的水体透明度反演模型——以鄱阳湖国家自然保护区为例[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(3): 235-240.
- [56] Duan H T, Ma R H, Zhang Y Z, et al. Remote-sensing assessment of regional inland lake water clarity in northeast China[J]. *Limnology*, 2009, 10(2): 135-141.
- [57] Zhao D H, Cai Y, Jiang H, et al. Estimation of water clarity in Taihu Lake and surrounding rivers using Landsat imagery[J]. *Advances in Water Resources*, 2011, 34(2): 165-173.
- [58] 王爱华, 史学军, 杨春和, 等. 基于 CBERS 数据的农区水体透明度遥感模型研究[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(2): 172-179.
- [59] Yüzügüllü O, Aksoy A. Determination of Secchi Disc depths in Lake Eymir using remotely sensed data[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2011, 19: 586-592.
- [60] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters-A reappraisal[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C4): 7163-7180.
- [61] Morel A, Gentili B. Radiation transport within oceanic (case 1) water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C6): C06008.
- [62] Carlson R E. A trophic state index for lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(2): 361-369.
- [63] Y S, K M. Optical environmental research of areas from the mouth of Tokyo Bay to Sagami Nada in

- Autumn[J]. *Jamstectr*, 1981, 7: 101-112.
- [64] 费尊乐, 李宝华, 夏滨. 浮游植物与海水光化学参数之间的相关关系的研究[C]//国家海洋局科技司. 黑潮调查研究论文集 (三). 北京: 海洋出版社, 1991: 143-149.
- [65] 李宝华, 傅克忖. 南黄海浮游植物与水色透明度之间相关关系的研究[J]. *黄渤海海洋*, 1999, 17(3): 73-79.
- [66] Megard R O, Berman T. Effects of algae on the Secchi transparency of the southeastern Mediterranean Sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(8): 1640-1655.
- [67] Morel A, Huot Y, Gentili B, et al. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(1): 69-88.
- [68] Preisendorfer R W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(5): 909-926.
- [69] Doron M, Babin M, Mangin A, et al. Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: C06003.
- [70] Lee Z, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [71] 魏国妹, 商少凌, 李忠平, 等. 基于固有光学特性的北部湾透明度遥感反演及其检验[J]. *高技术通讯*, 2009, 19(9): 977-982.
- [72] 林法玲. 1998~2010 年夏季台湾海峡西部沿岸海水遥感透明度的年际变化[J]. *台湾海峡*, 2012, 31(3): 301-306.
- [73] Lee Z P, Arnone R, Hu C M, et al. Quantification of uncertainties in remotely derived optical properties of coastal and oceanic waters[C]// Hou W L. *Ocean Sensing and Monitoring II*(7678). Arnone Orlando, Florida: SPIE, 2010: 1-8.

(本文编辑: 刘珊珊)